



ГЕОГРАФИЯ

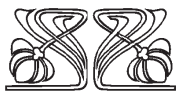
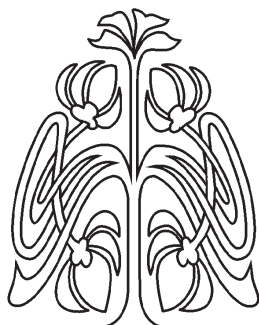
Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2021. Т. 21, вып. 1. С. 4–11

Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Earth Sciences, 2021, vol. 21, iss. 1, pp. 4–11

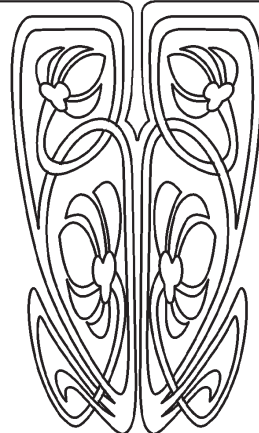
Научная статья

УДК 574.636 (470.54)

<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-1-4-11>



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ



Оценка техногенной нагруженности Нижнетагильского городского пруда и управление геоэкологическими рисками на основе мультифрактальной динамики

В. В. Кульнев^{1✉}, А. Н. Насонов², И. В. Цветков³, Л. А. Межова⁴

¹Отдел государственного экологического надзора по Воронежской области Центрально-Черноземного межрегионального управления Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Ломоносова, д. 105

²Российский государственный аграрный университет – Московский сельскохозяйственный академии имени К. А. Тимирязева, Россия, 127550, г. Москва, Тимирязевская ул., д. 49

³Тверской государственный университет, Россия, 170100, г. Тверь, ул. Желябова, д. 33

⁴Воронежский государственный педагогический университет, Россия, 394043, г. Воронеж, ул. Ленина, д. 86

Кульнев Вадим Вячеславович, кандидат географических наук, ведущий специалист-эксперт, kulnev@rpn36.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1646-9183>

Насонов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, adn22@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4927-2192>

Цветков Илья Викторович, доктор технических наук, профессор, mancu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5284-880X>

Межова Лидия Александровна, кандидат географических наук, доцент, lidiya09@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6652-5120>

Аннотация. В основе альгоремедиации, которая представляет собой способ очистки природных и сточных вод за счет метаболического потенциала хлорококковых микроводорослей, лежит принцип системной устойчивости. Показан метод определения степени загрязнения техногенно нагруженного водного объекта, основанный на применении фрактального исчисления. С помощью факторного анализа определены параметры порядка экологической системы Нижнетагильского городского пруда, на которых базируется новый подход к оценке эффективности природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: альголизация, альгоремедиация, гидробиоценоз, качество воды, мультифрактальная динамика, загрязнители, сине-зеленые водоросли, самоорганизация, толерантность, управление геоэкологическими рисками, экотоксиканты

Для цитирования: Кульнев В. В., Насонов А. Н., Цветков И. В., Межова Л. А. Оценка техногенной нагруженности Нижнетагильского городского пруда и управление геоэкологическими рисками на основе мультифрактальной динамики // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2021. Т. 21, вып. 1. С. 4–11. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-1-4-11>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)



Article

<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-1-4-11>

Assessment of technogenic load of Nizhny Tagil city pond and environmental risk management based on multifractal dynamics

Vadim V. Kul'nev¹✉, kulnev@rpn36.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1646-9183>

Andrey N. Nasonov², adn22@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4927-2192>

Il'ya V. Tsvetkov³, mancu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5284-880X>

Lidiya A. Mezhova⁴, lidiya09@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6652-5120>

¹Central Black Earth Interregional Administration of the Federal Service for Supervision of Natural Resources, 105 Lomonosov St., Voronezh 394087, Russia

²Russian State Agrarian University – Moscow Academy of Agriculture named K. A. Timiryazev, 49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia

³Tver' State University, 33 Zhelyabova St., Tver' 170100, Russia

⁴Voronezh State Pedagogical University, 86 Lenina St., Voronezh 394043, Russia

Abstract. Allogremiation which is a method of natural and waste water treatment due to the metabolic potential of chlorococcal microalgae is based on the principle of system stability. The method of pollution degree estimation of anthropogenic loaded water object based on the application of fractal calculation is shown. Factor analysis has been used to determine the parameters of the environmental system of Nizhny Tagil city pond which are the basis for a new approach to evaluating the efficiency of environmental protection measures through geocological risk management.

Keywords: algolization, allogremiation, hydrobiocenosis, water quality, multifractal dynamics, pollutants, blue-green algae, self-organization, tolerance, risk management, ecotoxicants

For citation: Kul'nev V. V., Nasonov A. N., Tsvetkov I. V., Mezhova L. A. Assessment of technogenic load of Nizhny Tagil city pond and environmental risk management based on multifractal dynamics. *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Earth Sciences*, 2021, vol. 21, iss. 1, pp. 4–11 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-1-4-11>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Введение

Стержневой особенностью используемого в статье фрактального подхода к описанию сложных техноприродных объектов (процессов) является изучение их структуры в связи с изменением среды обитания. Это позволяет рассматривать такое описание как инструмент изучения их морфологии. Данный подход дает возможность связать интегральные свойства объекта с динамикой локальных параметров разного генезиса, проявляющихся при структурной декомпозиции сложноорганизованных систем [1].

В математическом плане фрактальное описание многоуровневых техноприродных объектов (процессов) сводится к тому, что исследуемый объект воспроизводится в виде множества копий фрактальных эталонов, последовательность которых в пределе исчерпывает его геометрию (масштабирование) и сводится к одному или нескольким (в случае мультифрактальности) числам – фрактальным размерностям $D \in (1; 2)$, определяющим меру его внутренней сложности [2].

Любая экосистема функционирует в характерных для нее пределах системной достаточности действующих факторов, в которых она не утрачивает своей устойчивости. Благодаря самоорганизации поддерживается гомеостаз экосистемы, под которым понимается ее способность поддерживать устойчивое динамическое равновесие в изменяющейся техногенной на-

грузке, определяющей экологическое состояние среды обитания.

При гомеостазе размер экосистемы или развитость ее структуры соответствуют выполняемым ею функциям самосохранения и развития, в противном случае она будет неэффективной или неконкурентоспособной. В гомеостазе экосистема достигает наибольшей эффективности функционирования. Однако по мере приближения уровня действующих факторов к своему лимиту эффективность функционирования экосистемы резко снижается, и она переходит в режим самосохранения. При этом гомеостаз сменяется на неустойчивое равновесие, а в экосистеме происходят качественные изменения.

В неустойчивом равновесии резко возрастает роль случайных флуктуаций действующих факторов, которые могут вывести экосистему за пределы системной достаточности, что, в конечном итоге, приводит к ее разрушению. Иными словами, в самоорганизующейся динамической экосистеме всегда присутствует два типа процессов: одни (компенсаторные) сохраняют и закрепляют ее строение и функциональные особенности, а вторые (системообразующие) направлены на ее развитие. Благодаря соразмерности системообразующих и компенсаторных процессов экосистема может самосохраняться и развиваться в обновляющейся среде существования [3–5].

В этом плане фракталы оказались чрезвычайно удобным математическим инструментом описания многоуровневых техноприродных объектов



в динамически развивающейся среде, которые, подобно живому организму, способны управлять адаптацией экосистемы к внешнему фактору за счет самоорганизации [6, 7].

В физическом плане механизм самоорганизации, определяемый фракталом, задает такой структурный каркас сообществ, который сохраняет свою устойчивость за счет оптимального распределения потоков вещества и энергии в экосистеме [4].

Таким образом, фрактальность экосистемы можно рассматривать как свойство ее морфогенеза – функционального структурообразования, максимально приспособленного к условиям существования [8].

Математически фрактальность отражает характер самоподобия взаимодействующих сред объекта (хозяйственной и природной), геометрия которого связана с его свойствами степенной зависимостью [2]

$$M(\delta) = \mu\delta^{1-D}, \quad (1)$$

где $M(\delta)$ – размер объекта или развитость его структуры, $\mu\delta$ – шаг масштабирования, D – фрактальный показатель техногенной преобразованности экосистемы.

Из соотношения (1) следует, что если техноприродный объект является фракталом, то он сохраняет свою функциональную целостность (качество) в изменяющихся условиях техногенной нагрузки на компоненты окружающей природной среды [6, 9] (рис. 1).

Материалы и методы

Практическая ценность предлагаемого подхода состоит в том, что он позволяет заранее оценить и предупредить наступление геоэкологических рисков, связанных как с изменением условий техногенной эксплуатации экосистем, так и с включением новых источников загрязнения [10]. Тем самым, появляется возможность целевого управления хозяйственной деятельностью в постоянно меняющихся условиях внешней среды [9].

Качество экосистемы определяется биоразнообразием, которое поддерживается самоорганизацией сообществ живых организмов в изменяющейся среде существования. Наиболее опасное влияние на нарушение свойств мест обитания оказывает техногенная составляющая, в частности, приводящая к деградации экосистемы [11].

Выявление признаков деградации или разрушения экосистемы, которые обусловлены нарушением ее целостных свойств, возможно лишь в случае фрактального описания многоуровневой экосистемы, при котором геометрия объекта или развитость структуры связывается с его свойствами степенной зависимостью [12].

В этом случае степень экологических рисков, трактуемых как возможность нарушения функциональной целостности экосистемы в условиях высокой вероятности ее деградации, можно оценить через смещение ее фрактальных показателей от оптимума (низкие геоэкологические риски) к лимитирующим значениям устойчивости (высокие геоэкологические риски).

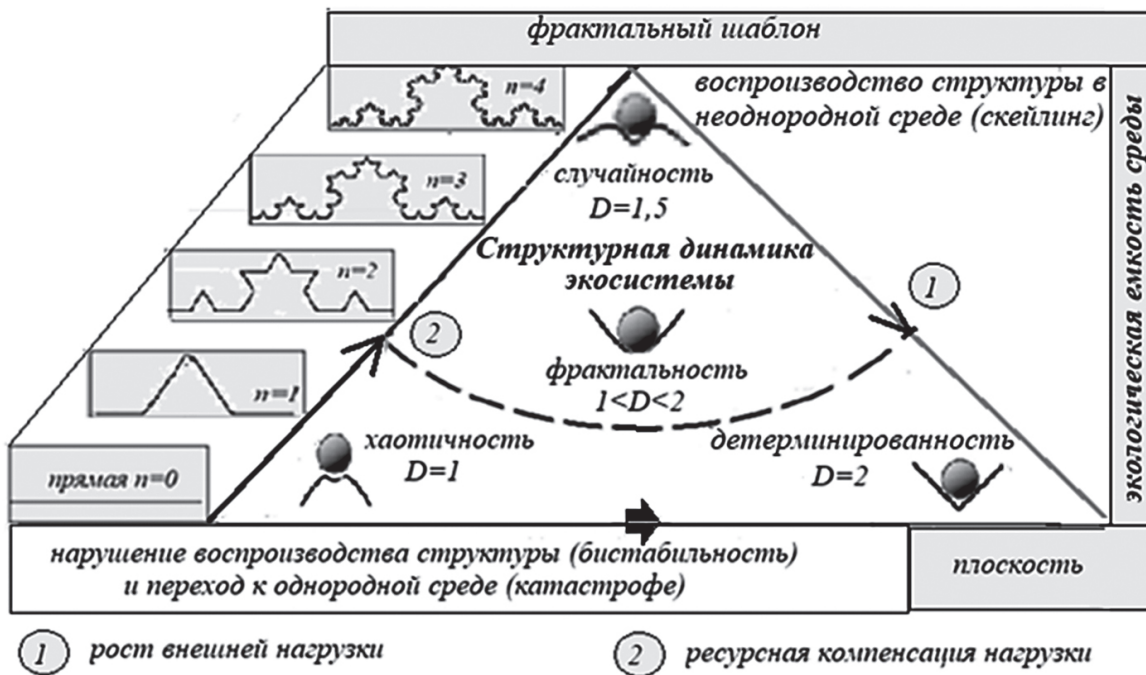


Рис. 1. Схема фрактального описания техноприродных объектов (процессов)



Другими словами, степень техногенной преобразования экосистемы и геоэкологического риска определяется близостью фрактальных показателей экосистемы к пределам ее устойчивости (табл. 1).

Очевидно, что для более полной характеристики техноприродных объектов (процессов) их обычно характеризуют не одним, а целым набором статистических признаков, результаты измерений которых представляют в виде мультифрактальных параметров (модели мультифрактальной динамики – МФД-модели), что позволяет лучше понять морфологию природного объекта и исследовать его специфику в условиях действия техногенных факторов [9].

Для связи фрактальности экосистемы с ее сохранением введем функцию фрактальной «температуры» процессов на интервале $D \in (1; 2)$ следующим образом:

$$T_f = a \times (1/(n - D) - 1/n), \quad (2)$$

где D – фрактальный показатель экосистемы, n – размерность пространства, в которое вложен фрактальный объект, a – поправочный коэффициент, выбираемый индивидуально (в нашем случае $n = 2, a = 1$).

Введем также ограничения фрактальности функции (2) в виде характеристических точек Dd и Dk , лимитирующих устойчивость экосистемы.

Обратим внимание на то, что распределение функции отклика (2) на фрактальной шкале $D \in (1; 2)$ имеет логистический характер, аналогичный распределению плотности биоресурса в модели Лотки–Вольтерры («хищник–жертва»), где «жертвой» выступает природная среда, а «хищником» – техногенное воздействие [13] (рис. 2).

На данном основании МФД-модель можно считать фрактальным эквивалентом модели Лотки–Вольтерры, в которой плотность биоресурса ограничена экологической емкостью среды, варьируемой в пределах дефицита $\lim(\inf \epsilon) = Dr$ и избыточности $\lim(\sup \epsilon) = Dk$ факторов. В этом случае диапазон, в котором возможны вариации плотности биоресурса, определяет толерантность (сохранение) экосистемы [14].

В пределах устойчивости сохранение метаболизма экосистемы с внешней средой обеспечивается ее самоорганизацией, за счет которой поддерживается относительное постоянство развитости экосистемы через воспроизводство ее биоресурса [13].

Если в результате наступления дефицита или избыточности факторов воспроизводство экосистемы нарушается: $d\epsilon/dt = 0$, то она теряет устойчивость. В этом состоянии экосистема становится чрезвычайно чувствительной к случайным флуктуациям внешних факторов, которые закономерно приводят к ее деградации или разрушению за конечное время: $d\epsilon/dt < 0$ [15].

Поскольку устойчивость определяется как ресурсная способность экосистемы сохранять (или восстанавливать) динамическое равновесие с внешней средой [16, 17], то введенные ограничения отображают соразмерность ресурсных затрат уровню техногенной нагрузки, при котором сохраняются функциональная целостность или качество экосистемы.

Тогда уравнение мультифрактальной динамики (МФД) экосистемы можно представить в следующем виде:

$$Dp = \sum_{j=1}^z a_{ij} F_j(D) / 2; \quad C_H = 2^{H-1} - 1, \quad (3)$$

Таблица 1

Обобщенные решения МФД-модели и их фазовые диаграммы

Фрактальная мера антропогенного преобразования экосистемы, Dp	Фазовые диаграммы
$Dp \rightarrow Do$ Экологический оптимум (неоднородная среда с максимально возможной развитостью структуры)	
Саморегуляция экосистемы при чередовании фаз цикла: – угнетения $Dd < Dp < Do$ – адаптации $Do < Dp < Dk$	
$Dp \rightarrow Dd; Dk$ Бистабильность (неустойчивое равновесие экосистемы при истощении биоресурса)	
$Dp > Dk$ Кризис (однородная среда при уровне нагрузки, несовместимой с жизнеспособностью экосистемы)	

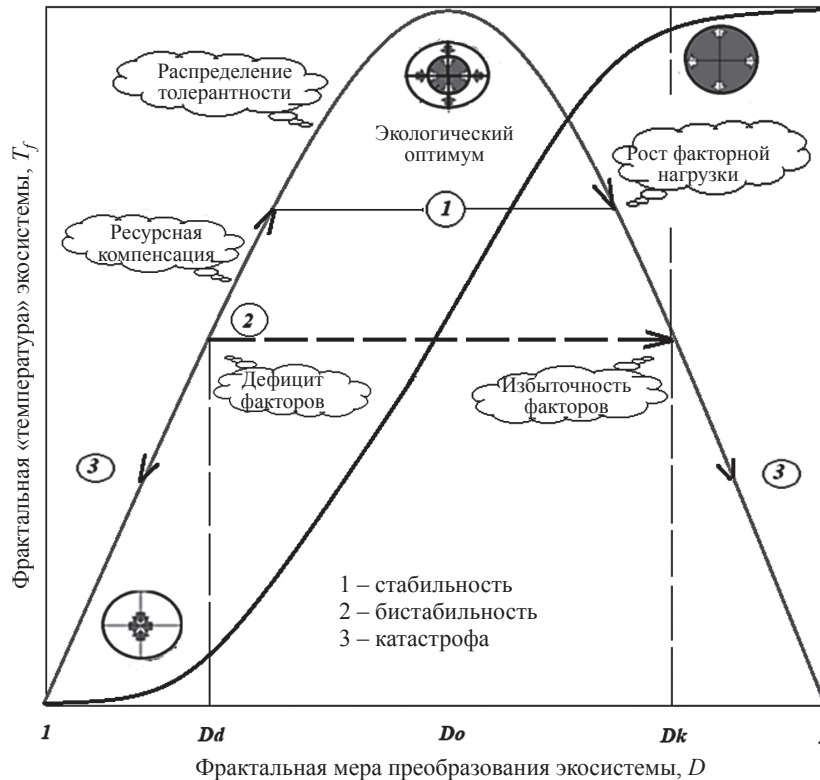


Рис. 2. Связь фрактальности экосистемы с ее сохранением

где Dp – фрактальная мера техногенного преобразования экосистемы, $F_j(D)$ – факторные нагрузки экосистемы, a_{ij} – весовые коэффициенты действующих факторов, C_H – фрактальный коэффициент корреляции действующих факторов, H – постоянная Херста.

В математическом плане анализ возможных решений (3) сводится к оценке соразмерности техноприродных процессов и приемлемости возникших рисков. Соразмерность техноприродных процессов означает, что между экосистемой и внешней средой возникает устойчивый цикл саморегуляции, благодаря которому происходит самоочищение экосистемы, обеспечиваемое фрактальностью ее структуры (см. табл. 1).

Управление развитием опасных техноприродных процессов следует начинать при их смещении к бистабильности, когда фиксируется рост непроизводительных затрат биоресурса экосистемы при наличии загрязнений, с утилизацией которых она не может справиться самостоятельно (см. табл. 1). Это позволяет предотвращать нежелательные режимы техногенной эксплуатации экосистем, угрожающие гомеостазу биотопов.

Решение МФД-модели (3) предлагается осуществить на основе метода главных компонент (МГК), который позволит оценить интенсивность влияния техногенного и ресурсного факторов на наблюдаемые характеристики экосистемы, а также выделить в значениях те составляющие, которые обусловлены суммарным действием факторов и каждого фактора в отдельности [18–20].

Результатом решения МФД-модели является оценка техногенной преобразованности экосистемы и сопровождающих рисков, при этом критерием оценки выступает соразмерность техногенной и ресурсной составляющих экосистемы (см. табл. 1).

С системной точки зрения МФД-модель описывает динамику притока и стока техногенных субстанций вещества и энергии в экосистеме, наиболее эффективный метаболизм, обеспечиваемый фрактальностью ее структуры [21, 22].

Из МФД-модели также следует, что приемлемый сценарий развития техногенеза, обеспечивающий сохранение качества экосистемы, достигается в том случае, когда экосистема может регулировать плотность своего биоресурса при изменении параметров внешней среды [23].

В состоянии неустойчивости равновесие экосистемы со средой достигается лишь в одной точке фазового пространства, в которой она сохраняет целостные свойства [12, 15].

В этом плане фрактальность экосистемы формально разделяет нормативную и предельно допустимую экологическую нагрузки и связанные с ней геоэкологические риски, управление которыми обеспечивает стабильность развития. При этом самоорганизация является тем системообразующим механизмом, который обеспечивает устойчивое функционирование экосистемы при сохранении функции утилизации поступающих извне загрязнений [11].



Результаты и их обсуждение

В соответствии с вышеизложенным представим апробацию оценки техногенной преобразованности и геоэкологических рисков Нижнетагильского городского пруда в виде следующих пошаговых процедур.

1. Анализ гидрохимических проб – производится в соответствии с утвержденными методиками не менее чем по 10–14 компонентам и показателям. Для этого используются стационарные створы, отбор проб в которых позволяет судить о пространственном распределении загрязнения по всему водному объекту (рис. 3).

2. Расчет фрактальных показателей экосистемы для оценки самоподобия техноприродных процессов – производится для каждого створа в отдельности. Он осуществляется по временным

рядам выбранных гидрохимических параметров. В результате расчетов формируется первичная статистика, которая используется в дальнейшем для оценки.

Для оценки фрактальной меры техногенной преобразованности и рисков развития опасных техноприродных процессов из матрицы факторных нагрузок выбираются параметры порядка – переменные с максимальными коэффициентами положительных и отрицательных корреляций действующих факторов, определяющих структурирование экосистемы (см. рис. 3).

Согласно модели (3) фрактальную меру техногенной преобразованности экосистемы рассчитываем как количественное выражение компенсаторной реакции экосистемы на воздействие загрязняющих веществ:

$$Dp = (1,52+1,2)/2 = 1,36. \quad (4)$$

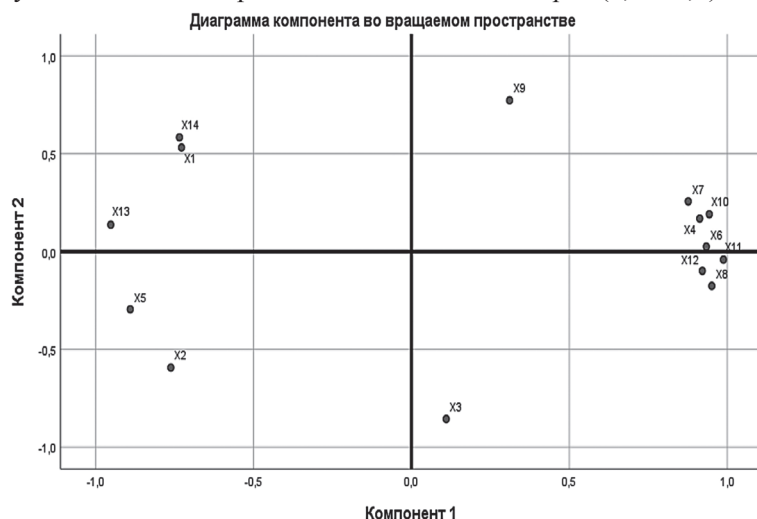


Рис. 3. Структура экосистемы Нижнетагильского пруда в створе 1 в пространстве главных компонент

Таблица 2

Динамика фрактальных показателей Нижнетагильского городского пруда, створ 1

Анализируемые показатели	Динамика					
Взвешенные вещества (X_1)	1,21	1,23	1,19	1,25	1,27	1,23
Водородный показатель (X_2)	1,32	1,35	1,38	1,36	1,38	1,41
Фосфаты (X_3)	1,58	1,62	1,64	1,58	1,61	1,6
Железо общее (X_4)	1,72	1,75	1,68	1,66	1,58	1,61
Марганец (X_5)	1,15	1,21	1,27	1,28	1,33	1,28
Медь (X_6)	1,56	1,51	1,48	1,42	1,39	1,45
Цинк (X_7)	1,69	1,65	1,61	1,58	1,6	1,55
Аммоний (X_8)	1,68	1,64	1,69	1,55	1,48	1,49
Нитраты (X_9)	1,62	1,63	1,58	1,66	1,59	1,55
Нитриты (X_{10})	1,59	1,55	1,49	1,45	1,44	1,45
ХПК (X_{11})	1,58	1,57	1,55	1,48	1,47	1,46
Нефтепродукты (X_{12})	1,68	1,72	1,69	1,62	1,58	1,58
БПК ₅ (X_{13})	1,26	1,31	1,28	1,35	1,39	1,36
Растворенный кислород (X_{14})	1,29	1,31	1,26	1,37	1,33	1,35



Заключение

Согласно полученному решению (4), для створа 1 Нижнетагильского городского пруда состояние экосистемы достаточно сильно смещено к неустойчивому равновесию, что говорит о выраженных процессах угнетения экосистемы.

Основными компонентами загрязнений, формирующих угнетение экосистемы, являются: нефтепродукты, соли аммония, цинк, медь, железо, марганец, взвешенные вещества, которые в целом повышают экологический риск нарушения устойчивости: резистентность экосистемы к загрязнениям составила 46,6% и снизилась почти вдвое относительно экологического оптимума (100%).

Важным является тот факт, что качественных изменений экосистемы еще не произошло, а последствия негативных техногенных преобразований обратимы. Для нормализации состояний в створе 1 необходимо исключить влияние факторов риска – загрязнителей, с которыми экосистема не может справиться за счет своего биоресурса. Источником поступления загрязняющих веществ в районе расположения анализируемого створа является вымывание марганца из пород, слагающих дно водоема, а источником поступления меди, железа, цинка являются затопленные в верховьях Леневого водохранилища, расположенного выше по течению реки Тагил, шахты Левихинского рудника.

Если указанные источники загрязнения невозможно полностью изолировать, то вариантом восстановления экосистемы крупного водоема может являться альгоремедиация. Альгоремедиация водоёмов с помощью представителя хлорококковой альгофлоры – зеленой микроводоросли *Chlorella vulgaris* – предотвращает «цветение» водоемов сине-зелёными водорослями, снижает содержание загрязняющих веществ [9, 23, 25–27] и в результате приводит к улучшению геоэкологического состояния водных объектов. При апробации описанных в настоящей статье математических приемов показано, что основным принципом альгоремедиации является искусственная интенсификация биотических механизмов компенсации техногенного воздействия на водные экосистемы разного уровня организации [9]. В процессе анализа изменения химического состава поверхностных вод, произошедшего в результате проведения альгоремедиации, можно определить ведущие факторы управления геоэкологическими рисками, которые лежат в основе разработки комплексного подхода к оценке эффективности обеспечения экологической безопасности водопользования.

Библиографический список

1. Изотов А. Д., Маврикиди Ф. И. Фракталы : делимость вещества как степень свободы в материаловедении. Самара : Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета, 2011. 128 с.

- Гапоненко А. В. Общая экология : учеб. пособие. Москва : Издательство Российского государственного строительного университета, 2006. 188 с.
- Гелашвили Д. Б., Иудин Д. И., Розенберг Г. С., Якимов В. Н., Солнцев Л. А. Фрактальные аспекты структурной устойчивости биотических сообществ // Биосфера. 2013. Т. 5, № 2. С. 143–159.
- Насонов А. Н., Кульнев В. В., Цветков И. В. Фрактальные модели нормирования техногенной нагрузки по показателям устойчивости экосистем // Управление развитием крупномасштабных систем MLS D'2019 : материалы Двенадцатой междунар. конф. / под общ. ред. С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. Москва : Институт проблем управления РАН им. В. А. Трапезникова, 2019. С. 1058–1059.
- Фракталы в науках о Земле : учеб. пособие / А. Н. Насонов, И. В. Цветков, И. М. Жогин [и др.]. Воронеж : Ковчег, 2018. 82 с.
- Фрактальный анализ биологической реабилитации водных объектов методом коррекции альгоценоза / А. Н. Насонов, И. В. Цветков, В. В. Кульнев [и др.] // Проблемы управления водными и земельными ресурсами : материалы междунар. науч. форума. Москва : РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, 2015. С. 165–180.
- Молчатский С. Л., Казанцев И. В., Матвеева Т. Б. Применение метода фрактального анализа для биоиндикационной оценки окружающей среды // Самарский научный вестник. 2016. № 4 (17). С. 28–31.
- Кульнев В. В., Насонов А. Н., Жогин И. М., Цветков И. В., Грабарник В. Е., Карелин Н. В. Об опыте проведения управляемой альгоремедиации рекреационного водоема // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24, № 3. С. 58–64.
- Анциферова Г. А., Кульнев В. В. Биотехнологии в управлении качеством искусственных водных объектов на примере Матвирского водохранилища // Комплексные проблемы техносферной безопасности : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2016. С. 152–157.
- Букварева Е. Н. Принцип оптимального биоразнообразия биосистем надорганизменного уровня : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Москва, 2013. 52 с.
- Подлазов А. В. Будущее прикладной математики // Лекции для молодых исследователей. Москва : Эдиториал УРСС, 2005. С. 404–426.
- Трубецков Д. И. Феномен математической модели Лотки–Вольтерры и сходных с ней // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 2. С. 69–86.
- Peter Turchin. Evolution in population dynamics // Nature. 2003. № 424. P. 257–258.
- Арнольд В. И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели. Москва : Издательство МЦНМО, 2004. 32 с.
- Опекунов А. Ю., Ганул А. Г. Теория и практика экологического нормирования в России : учеб. пособие. Санкт-Петербург : Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2014. 332 с.
- Светлосанов В. А. Устойчивость природных систем к природным и антропогенным воздействиям : учеб. пособие. Москва, 2009. 100 с.
- Дягилева А. Б. Современные проблемы окружающей среды. Санкт-Петербург : Издательство Санкт-Петербур-



бургского государственного технологического университета растительных полимеров, 2012. 109 с.

18. Факторный анализ в геологии : учеб. пособие / А. И. Бахтин, Н. М. Низамутдинов, Е. М. Хасанова, Н. М. Нуриева. Казань : Издательство Казанского государственного университета, 2007. 32 с.

19. Должикова Е. М. Анализ распределения загрязняющих веществ в урболандшафтах методом главных компонент : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2000. 23 с.

20. Никулина Н. Л. Влияние экологических факторов на качество жизни населения // Фундаментальные исследования. Пенза : Издательский Дом «Академия Естествознания», 2014. № 5-4. С 830–833.

21. Якимов В. Н., Солнцев Л. А., Розенберг Г. С., Иудин Д. И., Гелашвили Д. Б. Масштабная инвариантность биосистем : от эмбриона до сообщества // Онтогенез. 2014. Т. 45, № 3. С. 207–216.

22. Кульнев В. В., Анциферова Г. А., Насонов А. Н., Цветков И. В., Суздаева А. Л., Графкина М. В. Моделирование и анализ процессов альголизации технологического водоема Новолипецкого металлургического комбината на основе мультифрактальной динамики // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23, № 10. С. 66–71.

23. Анциферова Г. А., Кульнев В. В. Об опыте альголизации Фермских прудов (Москва) // Брянские географические чтения : сб. материалов / ред. кол. : Г. В. Лобанов [и др.]. Брянск : РИСО БГУ, 2019. С. 5–11.

24. Кульнев В. В., Базарский О. В. Механизмы изменения концентрации тяжелых металлов при проведении биологической реабилитации Матырского водохранилища методом коррекции альгоценоза // Чистая вода России : сб. материалов XII Междунар. науч.-практ. симпозиума и выставки. Екатеринбург : ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», 2013. С. 181–184.

25. Кульнев В. В., Почечун В. А. Опыт альголизации питьевых водоемов Нижнетагильского промышленного узла // Биосфера. 2016. Т. 8, № 3. С. 287–290.

26. Кульнев В. В., Почечун В. А. Применение альголизации питьевых водоемов Нижнетагильского промышленного узла // Медицина труда и промышленная экология. 2016. № 1. С. 20–21.

27. Кульнев В. В., Ступин В. И., Борзенков А. А. Биологическая реабилитация сточных вод сахарных заводов методом коррекции альгоценоза // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21, № 3. С. 16–20.

Поступила в редакцию 26.10.2020, после рецензирования 06.11.2020, принята к публикации 20.11.2020
Received 26.10.2020, revised 06.11.2020, accepted 20.11.2020